

## 発明の名称

長周期グレーティング素子およびその製造方法

## 発明の背景

### 技術分野

5 本発明は、光導波路の長手方向に沿った一定範囲において屈折率変調が形成されてコアモード光をクラッドモード光に変換する長周期グレーティング素子、および、この長周期グレーティング素子を製造する方法に関するものである。

### 背景技術

長周期グレーティング素子は、光導波路（光ファイバまたは平面光導波路）の長手方向に沿った一定範囲において長周期（数百 $\mu\text{m}$ 程度の周期）の屈折率変調が形成されている。この屈折率変調により、特定波長のコアモード光をクラッドモード光に変換することで、この特定波長光をコアからクラッドへと漏洩させる。このような長周期グレーティング素子は、入射する光のうち選択的に特定波長の光に対して損失を与えることから、光フィルタとして用いられる。また、長周期グレーティング素子は、無反射であるという特徴を有していることから、波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光伝送システムにおいて光増幅器の利得を等化する利得等化器などとして好適に用いられ得る。

単一の周期の屈折率変調が形成された長周期グレーティング素子は、通常の光通信で用いられる信号光の波長帯域において、ガウス関数で近似される形状の損失ピークを1つ有している。これに対して、光増幅器用の利得等化器は、光増幅器が有する利得スペクトルと同形状の損失スペクトルを有することが必要であって、損失ピーク波長が互いに異なる複数の損失ピークが重畳された形状の損失スペクトルを有することが必要である。このことから、利得等化器として好適に用いられる長周期グレーティング素子は、互いに周期の異なる屈折率変調が形成された複数の長周期グレーティングが融着などにより縦続接続されることで実現され得る。

## 発明の概要

しかしながら、上記の従来の複数の損失ピーク波長を有する長周期グレーティング素子は、複数の長周期グレーティングが縦続接続されたものであることから、サイズが大きい。特に、複数の長周期グレーティングが融着接続されたものである場合には、その融着のためにさらに余長部が必要であることから、さらに長尺化してしまう。

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、信号光波長帯域において複数の損失ピーク波長を有しサイズが小さい長周期グレーティング素子およびその製造方法を提供することを目的とする。

本発明に係る長周期グレーティング素子は、長手方向に沿って一定範囲の屈折率を数百 $\mu\text{m}$ オーダーで周期的に変調させた長周期グレーティング素子であって、この一定範囲には、複数の第1領域が離散的に配置され、これら第1領域内の各位置の屈折率は、一定範囲内全体を通じて第1の周期で屈折率が変調されているときと同一の屈折率に変調されていることを特徴とする。

この長周期グレーティング素子は、上記一定範囲において複数の第1領域それぞれに形成された第1周期の屈折率変調の寄与による損失ピークを有する他、上記一定範囲において複数の第1領域が離散的に配置されていることによる損失ピークを有する。前者の損失ピークの波長は、第1周期に応じて決定される。後者の損失ピークの波長は、複数の第1領域の配置により決定される。これらが適切に設定されることで、この長周期グレーティング素子は、通常の光通信で用いられる信号光の波長帯域において複数の損失ピークを有するものとなり、しかも、サイズを小さくすることができる。

これら第1領域の長さ間の偏差およびその間の長さ間の偏差がいずれも第1の周期の2倍より小さいことが好ましい。この場合に、第1領域は、実質的に一定の長さで一定の周期で配置されているものとみなし得る。そして、上記一定範囲において複数の第1領域が離散的に配置されていることによる損失ピークの波長

は、この長さ、周期を適切に設定することで調整される。

第1領域の各領域の屈折率変調の振幅が互いに等しいことが、複数の第1領域それぞれにおける平均屈折率が一定となるから好適である。

さらに、一定範囲内の第1領域を除いた領域に離散的に配置された複数の領域であって、各領域の各位置の屈折率は、一定範囲内全体を通じて第1の周期とは異なるそれぞれ固有の周期で屈折率が変調されているときと同一の屈折率に変調されている領域群を1つないし複数群備えていることが好ましい。この場合には、長周期グレーティング素子は、さらに、上記一定範囲において各領域群の領域それぞれに形成された屈折率変調の寄与による損失ピークを有する他、上記一定範囲において各領域群中の領域が離散的に配置されていることによる損失ピークを有する。

各群の領域が隙間なく順番に配置されていると、長周期グレーティング素子のサイズを小さくする上で好適である。

これら各領域の長さ間の偏差およびそれらの間の長さ間の偏差がいずれも当該領域の屈折率周期の2倍より小さく設定されていると、各群の領域は、一定の長さで一定デューティ比で配置されているものとみなし得る。そして、上記一定範囲において各群の領域が離散的に配置されていることによる損失ピークの波長は、これらの配置の周期を適切に設定することで調整される。

各領域のそれぞれの領域の屈折率変調の振幅を同一群内で互いに等しく設定すると、同一群内の各領域間の平均屈折率が一定となるから好適である。全領域で互いに等しく設定すると全領域の平均屈折率が一定となるから好適である。

本発明に係る長周期グレーティング素子製造方法は、上記の本発明に係る長周期グレーティング素子を製造する方法であって、一定の範囲に沿ってその全域に所定の周期に応じてマスクパターンが形成された第1の強度変調マスクと、一定の範囲に沿って複数の光透過部の間に光遮断部が配置されている第2の強度変調マスクとを用意し、これら2つの強度変調マスクを互いに重ねて加工対象となる

光導波路上に配置し、これら2つのマスクを透過した屈折率変化誘起光を光導波路に照射して屈折率変化を起こさせて長周期グレーティングを製造することを特徴とする。

さらに、第1の強度変調マスクとしてマスクパターンの異なる複数のマスクを用意し、第2の強度変調マスクとして光透過部の配置の異なる複数のマスクを用意し、第1の強度変調マスクと第2の強度変調マスクの組み合わせを代えてマスクの配置、屈折率変化誘起光照射を繰り返せば複数の群を形成することが可能となる。

#### 図面の簡単な説明

図1は、本発明に係る長周期グレーティング素子の第1実施形態の説明図である。図2は、その屈折率変調の説明図である。

図3～図4は、第1実施形態の長周期グレーティング素子の透過特性の例を示す図である。

図5は、比較例1の長周期グレーティング素子と比較例2の長周期グレーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性を示す図である。

図6は、本発明に係る長周期グレーティング素子の第2実施形態の説明図である。

図7は、図6の長周期グレーティング素子の透過特性の一例を示す図である。

図8は、比較例3Aの長周期グレーティング素子と比較例3Bの長周期グレーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性を示す図である。

図9A～図9Cは、図6の長周期グレーティング素子を製造する際に用いられる強度変調マスクの説明図である。

図10A、B、図11A、Bは、図6の長周期グレーティング素子の製造方法の説明図である。

図12は、本発明に係る長周期グレーティング素子の第3実施形態の説明図であり、図13は、その透過特性の一例を示す図である。

### 発明の好適な実施形態

以下、添付図面を参照して本発明の好適な実施の形態について詳細に説明する。説明の理解を容易にするため、各図面において同一の構成要素に対しては可能な限り同一の参照番号を附し、重複する説明は省略する。なお、各図における寸法比は、説明のため誇張している部分があり、必ずしも実際の寸法比とは一致しない。

#### (第1実施形態)

先ず、本発明に係る長周期グレーティング素子の第1実施形態について説明する。図1は、第1実施形態の長周期グレーティング素子1の説明図である。この図は、光軸を含む面で長周期グレーティング素子1を切断したときの断面を示している。この図に示された長周期グレーティング素子1は、 $\text{GeO}_2$ が添加されたコア領域11とこれを取り囲むクラッド領域12とを含む石英系の光ファイバ10の長手方向に沿った一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれに第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調がコア領域11に形成されている。

長手方向（光軸方向）にz軸を設定すると、一定範囲Wにおける位置zにおける屈折率変調 $f(z)$ は、第1方形波関数 $F_1(z)$ と、周期関数 $F_2(z)$ との積、 $f(z) = F_1(z) F_2(z)$ で表される。

ここで第1方形波関数 $F_1(z)$ とは、

$$\begin{aligned} F_1(z) &= 1 && (\text{領域A内}) \\ F_1(z) &= 0 && (\text{領域A以外}) \end{aligned} \quad (1)$$

となる関数である。また、周期関数 $F_2(z)$ とは、所定の第1周期 $\Lambda_1$ を有する周期関数 $F_2(z)$ であり、屈折率変調の振幅を一定の $\Delta n_{uv}$ であるとする、

$$F_2(z) = \Delta n_{uv} \left( 1 + \cos \frac{2\pi}{\Lambda_1} z \right) \quad (2)$$

として表せる。図2は、第1実施形態に係る長周期グレーティング素子1の屈折率変調の説明図である。図中実線が屈折率変調 $f(z)$ であり、破線は、周期関

FP01-0170-00

数 $F_2(z)$ に該当する。つまり、第1領域 $\Lambda$ 内の各位置の屈折率は、屈折率変調が周期関数 $F_2(z)$ により設定されている場合と同じ結果となる。

ここで、図1に示すように、複数の第1領域 $A$ それぞれが一定周期 $L_0$ で配置されていて、複数の第1領域 $A$ それぞれの長さを $L_1$ とする。このとき、上記(1)式は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ である方形波関数となり、フーリエ級数展開が可能となる。そして、一定範囲 $W$ における屈折率変調 $f(z)$ は、

$$\begin{aligned} f(z) = & \Delta n_{uv} \left( 1 + \cos \frac{2\pi}{\Lambda_1} z \right) \frac{L_1}{L_0} \\ & + \Delta n_{uv} \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{2}{m\pi} \sin \frac{m\pi L_1}{L_0} \cos \frac{2m\pi}{L_0} z \right) \\ & + \Delta n_{uv} \cos \frac{2\pi}{\Lambda_1} z \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{2}{m\pi} \sin \frac{m\pi L_1}{L_0} \cos \frac{2m\pi}{L_0} z \right) \end{aligned} \quad (3)$$

なる式で表される。

一方、一定範囲 $W$ の全体に亘って第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調が振幅 $\Delta n'_{uv}$ で形成されている従来の場合、その屈折率変調 $f_0(z)$ は、

$$f_0(z) = \Delta n'_{uv} \left( 1 + \cos \frac{2\pi}{\Lambda_1} z \right) \quad (4)$$

なる式で表される。

上記(3)式と上記(4)式とを比較すると、以下のことが言える。すなわち、上記(3)式の右辺第1項は、屈折率変調振幅 $\Delta n_{uv}$ を適切に設定することで、上記(4)式と同形となる。このことから、本実施形態に係る長周期グレーティング素子1においては、上記(3)式の右辺第1項の寄与による損失ピークは、上記(4)式で屈折率変調が表される従来 of 長周期グレーティングにおける損失ピークと同様の形状とすることができる。

上記(3)式の右辺第2項は、上記(1)式の方形波関数 $F_1(z)$ の周期成分である。 $L_0$ と $\Lambda_1$ との間に

$$L_0 \gg \Lambda_1 \quad (5)$$

なる関係があることを考慮すると、上記(3)式の右边第2項は、第1項の寄与による損失ピークの波長より長波長側における損失特性に影響を与えるものである。

また、上記(3)式の右边第3項は、

$$\frac{\Delta n_{uv}}{2} \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{2}{m\pi} \sin \frac{m\pi L_1}{L_0} \left\{ \cos 2\pi \left( \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{m}{L_0} \right) z + \cos 2\pi \left( \frac{1}{\Lambda_1} - \frac{m}{L_0} \right) z \right\} \right] \quad (6)$$

なる式に変形することができる。すなわち、上記(3)式の右边第3項は、周期 $\Lambda_1$ と周期 $m/L_0$ とのビートによる損失ピークを与えるものである。したがって、本実施形態に係る長周期グレーティング素子1は、 $L_0$ の値を適切に設定することにより、通常の光通信で用いられる信号光の波長帯域（例えば1520nm～1600nm）において、上記(3)式の右边第1項に基づく損失ピークの他に、上記(3)式の右边第3項に基づく損失ピークをも有することができる。

なお、以上の説明では、第1方形波関数 $F_1(z)$ は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるとした。ただし、複数の第1領域Aそれぞれの長さ $L_1$ の偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さく、複数の第1領域Aの間の間隔の長さの偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さければ、第1方形波関数 $F_1(z)$ は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるとしてよい。また、以上の説明では、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数 $F_2(z)$ は、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調の振幅が等しいとした。このようにすると、複数の第1領域Aそれぞれにおける平均屈折率が一定となるから好適である。

次に、第1実施形態に係る長周期グレーティング素子1の実施例（実施例1、実施例2）について説明する。

図3は、実施例1の長周期グレーティング素子の透過特性を示す図である。実施例1の長周期グレーティング素子は、 $L_0=4\text{mm}$ 、 $L_1=2\text{mm}$ 、 $\Lambda_1=360\mu\text{m}$ 、第1領域Aの数が10であり、一定範囲Wの長さが38mmである。この実施例1の長周期グレーティング素子の透過特性は、図3中に実線で示されている。また、図3中に破線で示されたものは、比較例1の長周期グレーティング素

子（長さ38mmの全体に亘って一定周期の屈折率変調が形成されたもの）の透過特性である。

図3から判るように、実施例1の長周期グレーティング素子は、比較例1の長周期グレーティング素子と同様に、波長1530nm付近で損失ピークを有している。この波長1530nm付近損失ピークは上記(3)式の右辺第1項に基づくものである。また、実施例1の長周期グレーティング素子は、比較例1の長周期グレーティング素子とが異なり、波長1465nm付近および1620nm付近それぞれでも損失ピークを有している。これらの損失ピークは上記(3)式の右辺第3項に基づくものである。

図4は、実施例2の長周期グレーティング素子の透過特性を示す図である。実施例2の長周期グレーティング素子は、 $L_0=10.6\text{mm}$ 、 $L_1=6.1\text{mm}$ 、 $\Lambda_1=360\mu\text{m}$ 、第1領域Aの数が4であり、一定範囲Wの長さが38mmである。この実施例2の長周期グレーティング素子の透過特性は、図4中に実線で示されている。また、図4中に破線で示されたものは、比較例2の長周期グレーティング素子（長さ38mmの全体に亘って一定周期373.5 $\mu\text{m}$ の屈折率変調が形成されたもの）の透過特性である。図5は、比較例1の長周期グレーティング素子と比較例2の長周期グレーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性を示す図である。

図4から判るように、実施例2の長周期グレーティング素子は、波長1530nm付近で損失ピーク（上記(3)式の右辺第1項に基づくもの）を有している他、波長1505nm付近および波長1560nm付近それぞれでも損失ピーク（上記(3)式の右辺第3項に基づくもの）を有している。また、図4と図5との比較から判るように、通常の光通信で用いられる信号光の波長帯域（例えば1520nm～1600nm）において、実施例2の長周期グレーティング素子の透過特性は、比較例1の長周期グレーティング素子と比較例2の長周期グレーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性と略等しい。このように、実施例2



の長周期グレーティング素子は、信号光波長帯域において複数の損失ピーク波長を有していてもサイズが小さい。

(第2実施形態)

次に、本発明に係る長周期グレーティング素子の第2実施形態について説明する。図6は、第2実施形態に係る長周期グレーティング素子2の説明図である。この図は、光軸を含む面で長周期グレーティング素子2を切断したときの断面を示している。この図に示された長周期グレーティング素子2は、 $\text{GeO}_2$ が添加されたコア領域21とこれを取り囲むクラッド領域22とを含む石英系の光ファイバ20の長手方向に沿った一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれに第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調がコア領域21に形成されており、複数の第2領域Bそれぞれに第2周期 $\Lambda_2$ の屈折率変調がコア領域21に形成されている。第1領域Aと第2領域Bとは、互いに重なることはなく、長手方向に沿って交互に設けられている。また、第1周期 $\Lambda_1$ と第2周期 $\Lambda_2$ とは互いに異なる。

一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調は、第1実施形態の場合と同様に、第1領域Aにおける値を1とし他の領域における値を0とする第1方形波関数と、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数との積で表される。また、これと同様に、一定範囲Wにおいて、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調は、第2領域Bにおける値を1とし他の領域における値を0とする第2方形波関数と、第2周期 $\Lambda_2$ の周期関数との積で表される。これにより、各領域内の屈折率は、一定範囲W内を所定の周期関数を有する屈折率変調パターンで変調させたときと同じ位置では同じ屈折率、変調パターンを有することになる。

なお、第1方形波関数は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるのが好適である。ただし、複数の第1領域Aそれぞれの長さ $L_1$ の偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さく、複数の第1領域Aの間隔の長さの偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さければ、第1方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるとしてよい。同様に、第2方形波関数は、周期が $L_0$ であってデ

ューティ比が $L_2/L_0$ であるのが好適である。ただし、複数の第2領域Bそれぞれの長さ $L_2$ の偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さく、複数の第2領域Bの間の間隔の長さの偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さければ、第2方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_2/L_0$ であるとしてよい。

5       また、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数は、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調の振幅が等しいのが好適である。同様に、第2周期 $\Lambda_2$ の周期関数は、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調の振幅が等しいのが好適である。さらに、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調の振幅と、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調の振幅とが、互いに等しいのも好適である。

本実施形態に係る長周期グレーティング素子2の透過特性は、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調による寄与分と、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調による寄与分とが、重畳されたものとなる。複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調による寄与分は、第1実施形態に示したものと同様である。また、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調による寄与分も、第1実施形態に示したものと同様である。

次に、第2実施形態に係る長周期グレーティング素子2の実施例（実施例3）について説明する。図7は、実施例3の長周期グレーティング素子の透過特性を示す図である。実施例3の長周期グレーティング素子は、 $L_0=4\text{ mm}$ 、 $L_1=2\text{ mm}$ 、 $L_2=2\text{ mm}$ 、 $\Lambda_1=360\text{ }\mu\text{ m}$ 、 $\Lambda_2=365\text{ }\mu\text{ m}$ 、第1領域Aの数が10であり、第2領域Bの数が10であり、一定範囲Wの長さが40 mmである。この実施例3の長周期グレーティング素子の透過特性は、図7中に実線で示されている。また、図7中には、比較例3Aの長周期グレーティング素子（長さ40 mmの全体に亘って一定周期363  $\mu\text{ m}$ の屈折率変調が形成されたもの）の透過特性、および、比較例3Bの長周期グレーティング素子（長さ40 mmの全体に亘って一定周期368  $\mu\text{ m}$ の屈折率変調が形成されたもの）の透過特性も示されている。図8は、比較例3Aの長周期グレーティング素子と比較例3Bの長周期グ

レーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性を示す図である。

図7から判るように、実施例3の長周期グレーティング素子は、波長1540 nm付近および波長1550 nm付近それぞれで損失ピーク（上記(3)式の右辺第1項に基づくもの）を有している。波長1540 nm付近の損失ピークは、第1領域Aにおける第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調の寄与である。一方、波長1550 nm付近の損失ピークは、第2領域Bにおける第2周期 $\Lambda_2$ の屈折率変調の寄与である。

また、実施例3の長周期グレーティング素子は、波長1475 nm付近、波長1485 nm付近、波長1625 nm付近および波長1640 nm付近それぞれでも損失ピーク（上記(3)式の右辺第3項に基づくもの）を有している。これらの損失ピークは、 $L_0$ を適切に設定することで、信号光波長帯域内に存在するようにすることができる。

また、図7と図8との比較から判るように、通常の光通信で用いられる信号光の波長帯域において、実施例3の長周期グレーティング素子の透過特性は、比較例3Aの長周期グレーティング素子と比較例3Bの長周期グレーティング素子とを融着接続した場合の全体の透過特性と略等しい。このように、実施例3の長周期グレーティング素子は、信号光波長帯域において複数の損失ピーク波長を有していてもサイズが小さい。

なお、実施例3の長周期グレーティング素子の第1領域Aにおける屈折率変調の周期 $\Lambda_1$ が360  $\mu\text{m}$ であるのに対して、比較例3Aの長周期グレーティング素子における屈折率変調の周期が363  $\mu\text{m}$ であって、比較例3Aの方が周期が長い。また、実施例3の長周期グレーティング素子の第2領域Bにおける屈折率変調の周期 $\Lambda_2$ が365  $\mu\text{m}$ であるのに対して、比較例3Bの長周期グレーティング素子における屈折率変調の周期が368  $\mu\text{m}$ であって、比較例3Bの方が周期が長い。これは、比較例3A、3Bと比較して実施例3では、短い長さで同様の透過特性を実現するために、屈折率変調の振幅が大きく、平均屈折率が大きくなる

FP01-0170-00

からである。すなわち、比較例 3 A、3 B と実施例 3 とでは平均屈折率が異なることから、これに応じて屈折率変調の周期を異ならせる必要がある。

一方で、使用波長帯域内に、グレーティング周期と繰り返し周期のビートによるピークが現れないようにするためには、以下の 4 式が満たされる必要がある。

$$5 \quad \frac{\Lambda_1 L_0}{L_0 + \Lambda_1} < \Lambda_s \quad (7)$$

$$\frac{\Lambda_2 L_0}{L_0 + \Lambda_2} < \Lambda_s \quad (8)$$

$$\Lambda_L < \frac{\Lambda_2 L_0}{L_0 - \Lambda_1} \quad (9)$$

$$\Lambda_T < \frac{\Lambda_2 L_0}{L_0 - \Lambda_2} \quad (10)$$

ここで、 $\Lambda_s$ 、 $\Lambda_L$  は使用帯域内のそれぞれ最短波長、最長波長で損失ピークを得るために必要とされる長周期グレーティングの屈折率周期である。

式 (7) (8) の左辺、式 (9) (10) の右辺は、それぞれグレーティング周期と繰り返し周期  $L_0$  のビート成分による周期であって、式 (6) 中の小かっこ内それぞれの逆数に対応する。式 (7) (9)、式 (8) (10) を整理すると、以下の関係が得られる。

$$\frac{\Lambda_L L_0}{L_0 + \Lambda_L} < \Lambda_1, \Lambda_2 < \frac{\Lambda_s L_0}{L_0 - \Lambda_s}$$

15 次に第 2 実施形態に係る長周期グレーティング素子 2 の製造方法について説明する。なお、以下に説明する製造方法では、途中段階で第 1 実施形態の長周期グレーティング素子 1 が得られ、これを加工して第 2 実施形態の長周期グレーティング素子 2 が得られる。

20 図 9 A ~ 図 9 C は、第 2 実施形態に係る長周期グレーティング素子 2 を製造する際に用いられる強度変調マスクの説明図である。図 9 A に示された強度変調マスク 7 は、屈折率変化誘起光に対して透明な材料（例えば石英ガラス）からなる

5 平板の一面に、或る一方向の長さ $W_1$  ( $W_1 > W$ ) の範囲に亘って、その屈折率変化誘起光を遮断する領域（例えば酸化クロムが蒸着された領域）が周期 $\Lambda_1$ で縞状に設けられたものである。ここで、屈折率変化誘起光は、 $GeO_2$ が添加された石英ガラスの屈折率を上昇させ得る波長の光であって、例えば、 $KrF$ エキシマレーザ光源から出力される波長 $248\text{ nm}$ の紫外レーザ光である。図9Bに示された強度変調マスク8は、屈折率変化誘起光に対して透明な材料からなる平板の一面に、或る一方向の長さ $W_2$  ( $W_2 > W$ ) の範囲に亘って、その屈折率変化誘起光を遮断する領域が周期 $\Lambda_2$ で縞状に設けられたものである。

10 また、図9Cに示された強度変調マスク9は、屈折率変化誘起光に対して透明な材料からなる平板の一面に、或る一方向の長さ $W_3$  ( $W_3 > W$ ) の範囲に亘って、その屈折率変化誘起光を遮断する領域（光遮断部）が周期 $L_0$ で2列平行に縞状に設けられたものである。第1列では屈折率変化誘起光を遮断する領域の長さ（上記一方向に沿った長さ）が $L_1$ であり、第2列では屈折率変化誘起光を遮断する領域の長さ（上記一方向に沿った長さ）が $L_2$ である。また、上記一方向に沿って見たときに、第1列における屈折率変化誘起光を遮断する領域と、第2列における屈折率変化誘起光を遮断する領域とは、交互に設けられている。各光遮断部の間は光を透過する光透過部として構成されている。

20 図10A、Bおよび図11A、Bは、第2実施形態に係る長周期グレーティング素子2の製造方法の説明図である。図10A、図11Aは、強度変調マスクに垂直な方向に見た図であり、図10B、図11Bは、強度変調マスクに平行であって光ファイバ20の長手方向に垂直な方向に見た図である。

25 最初に図10A、図10Bに示すように、強度変調マスク7の縞状部分（周期 $\Lambda_1$ ）と強度変調マスク9の第1列の縞状部分（遮断領域の長さ $L_1$ ）とを互いに重ねて光ファイバ20上に配置する。このとき、各強度変調マスク7、9の縞が光ファイバ20の長手方向に直交するように配置する。そして、これら2つの強度変調マスク7、9を介して光ファイバ20に、長手方向に沿って長さ $W$ の一定

FP01-0170-00

範囲にわたって均一な強度で屈折率変化誘起光（紫外光）を照射する。これにより、光ファイバ20の各第1領域Aに周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調が形成される。この時点で第1実施形態の長周期グレーティング素子1と同等の素子が注艦隊として得られる。

5 次に図11A、図11Bに示すように、強度変調マスク7と強度変調マスク8を交換し、光ファイバ20の長手方向に直交する方向に強度変調マスク9を並行移動させて、強度変調マスク8の縞状部分（周期 $\Lambda_2$ ）と強度変調マスク9の第2列の縞状部分（遮断領域の長さ $L_2$ ）とを互いに重ねた状態で光ファイバ20上に配置する。このとき、各強度変調マスク8、9の縞が光ファイバ20の長手方向と直交するように配置する。そして、これら2つの強度変調マスク8、9を介して光ファイバ20に、長手方向に沿った長さWの一定範囲に亘って均一な強度で屈折率変化誘起光（紫外光）を照射する。これにより、光ファイバ20の各第2領域Bに周期 $\Lambda_2$ の屈折率変調が形成される。

本実施形態に係る長周期グレーティング素子製造方法では、一定周期 $\Lambda_1$ の強度変調マスク7の一部が強度変調マスク9でマスクされて、光ファイバ20の第1領域Aに周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調が形成される。また、一定周期 $\Lambda_2$ の強度変調マスク8の一部が強度変調マスク9でマスクされて、光ファイバ20の第2領域Bに周期 $\Lambda_2$ の屈折率変調が形成される。したがって、この製造方法により製造される長周期グレーティング素子では、一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調は、第1領域Aにおける値を1とし他の領域における値を0とする第1方形波関数（周期 $L_0$ 、デューティ比 $L_1/L_0$ ）と、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数との積で表される。また、同様に、一定範囲Wにおいて、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調は、第2領域Bにおける値を1とし他の領域における値を0とする第2方形波関数（周期 $L_0$ 、デューティ比 $L_2/L_0$ ）と、第2周期 $\Lambda_2$ の周期関数との積で表される。すなわち、第2実施形態の長周期グレーティング素子2が製造される。

5 なお、第1領域Aにおいて周期 $\Lambda_1$ で等間隔で屈折率上昇部が形成されている範囲の一端から他端までを第1領域Aの長さ $L_1$ とし、第2領域Bにおいて周期 $\Lambda_2$ で等間隔で屈折率上昇部が形成されている範囲の一端から他端までを第2領域Bの長さ $L_2$ とすれば、強度変調マスク7と強度変調マスク9とが重ねられる際の各々の屈折率変化誘起光遮断領域の相対的位置関係によっては、複数の第1領域Aそれぞれの長さ $L_1$ は必ずしも一定ではなく、複数の第2領域Bそれぞれの長さ $L_2$ も必ずしも一定ではない。しかし、上記の製造方法により製造される長周期グレーティング素子では、各強度変調マスクが一定周期のものであるので、複数の第1領域Aそれぞれの長さ $L_1$ の偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さく、複数の第1領域Aの間隔の長さの偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さく、複数の第2領域Bそれぞれの長さ $L_2$ の偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さく、複数の第2領域Bの間隔の長さの偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さい。したがって、第1方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるとしてよく、同様に、第2方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_2/L_0$ であるとしてよく、上記(1)式～(6)式で述べたことが成り立つ。

### (第3実施形態)

次に、本発明に係る長周期グレーティング素子の第3実施形態について説明する。図12は、第3実施形態に係る長周期グレーティング素子3の説明図である。この図は、光軸を含む面で長周期グレーティング素子3を切断したときの断面を示している。この図に示された長周期グレーティング素子3は、GeO<sub>2</sub>が添加されたコア領域31とこれを取り囲むクラッド領域32とを含む石英系の光ファイバ30の長手方向に沿った一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれに第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調がコア領域31に形成されており、複数の第2領域Bそれぞれに第2周期 $\Lambda_2$ の屈折率変調がコア領域31に形成されており、複数の第3領域Cそれぞれに第3周期 $\Lambda_3$ の屈折率変調がコア領域31に形成されている。第1領域A、第2領域Bおよび第3領域Cそれぞれは、互いに重なることはなく、長

手方向に沿って順に設けられている。また、第1周期 $\Lambda_1$ 、第2周期 $\Lambda_2$ および第3周期 $\Lambda_3$ それぞれは互いに異なる。

一定範囲Wにおいて、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調は、第1実施形態の場合と同様に、第1領域Aにおける値を1とし他の領域における値を0とする第1方形波関数と、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数との積で表される。これと同様に、一定範囲Wにおいて、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調は、第2領域Bにおける値を1とし他の領域における値を0とする第2方形波関数と、第2周期 $\Lambda_2$ の周期関数との積で表される。また、一定範囲Wにおいて、複数の第3領域Cそれぞれにおける屈折率変調は、第3領域Cにおける値を1とし他の領域における値を0とする第3方形波関数と、第3周期 $\Lambda_3$ の周期関数との積で表される。

なお、第1方形波関数は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるのが好適である。ただし、複数の第1領域Aそれぞれの長さ $L_1$ の偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さく、複数の第1領域Aの間隔の長さの偏差が第1周期 $\Lambda_1$ の2倍より小さければ、第1方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_1/L_0$ であるとしてよい。同様に、第2方形波関数は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_2/L_0$ であるのが好適である。ただし、複数の第2領域Bそれぞれの長さ $L_2$ の偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さく、複数の第2領域Bの間隔の長さの偏差が第2周期 $\Lambda_2$ の2倍より小さければ、第2方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_2/L_0$ であるとしてよい。また、同様に、第3方形波関数は、周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_3/L_0$ であるのが好適である。ただし、複数の第3領域Cそれぞれの長さ $L_3$ の偏差が第3周期 $\Lambda_3$ の2倍より小さく、複数の第3領域Cの間隔の長さの偏差が第3周期 $\Lambda_3$ の2倍より小さければ、第3方形波関数は実質的に周期が $L_0$ であってデューティ比が $L_3/L_0$ であるとしてよい。

また、第1周期 $\Lambda_1$ の周期関数は、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変



調の振幅が等しいのが好適である。同様に、第2周期 $\Lambda_2$ の周期関数は、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調の振幅が等しいのが好適である。また、第3周期 $\Lambda_3$ の周期関数は、複数の第3領域Cそれぞれにおける屈折率変調の振幅が等しいのが好適である。さらに、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調の振幅、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調の振幅、および、複数の第3領域Cそれぞれにおける屈折率変調の振幅それぞれが、互いに等しいのも好適である。

本実施形態に係る長周期グレーティング素子3の透過特性は、複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調による寄与分、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調による寄与分、および、複数の第3領域Cそれぞれにおける屈折率変調による寄与分が、重畳されたものとなる。複数の第1領域Aそれぞれにおける屈折率変調による寄与分は、第1実施形態に示したものと同様である。また、複数の第2領域Bそれぞれにおける屈折率変調による寄与分も、第1実施形態に示したものと同様であり、複数の第3領域Cそれぞれにおける屈折率変調による寄与分も、第1実施形態に示したものと同様である。

次に、第3実施形態に係る長周期グレーティング素子3の実施例（実施例4）について説明する。図13は、実施例4の長周期グレーティング素子の透過特性を示す図である。実施例4の長周期グレーティング素子は、 $L_0 = 4.5 \text{ mm}$ 、 $L_1 = L_2 = L_3 = 1.5 \text{ mm}$ 、 $\Lambda_1 = 360 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $\Lambda_2 = 365 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $\Lambda_3 = 370 \text{ }\mu\text{m}$ 、第1領域Aの数が11であり、第2領域Bの数が11であり、第3領域Cの数が11であり、一定範囲Wの長さが49.5 mmである。

図13から判るように、実施例4の長周期グレーティング素子は、波長1530 nm付近、波長1545 nm付近および波長1560 nm付近それぞれで損失ピーク（上記(3)式の右辺第1項に基づくもの）を有している。波長1530 nm付近の損失ピークは、第1領域Aにおける第1周期 $\Lambda_1$ の屈折率変調の寄与である。波長1545 nm付近の損失ピークは、第2領域Bにおける第2周期 $\Lambda_2$ の屈

折率変調の寄与である。また、波長1560nm付近の損失ピークは、第3領域Cにおける第3周期 $\Lambda_3$ の屈折率変調の寄与である。

また、実施例4の長周期グレーティング素子は、波長1475nm付近、波長1485nm付近、波長1495nm付近、波長1605nm付近、波長1620nm付近および波長1635nm付近それぞれでも損失ピーク（上記(3)式の右辺第3項に基づくもの）を有している。これらの損失ピークは、 $L_0$ を適切に設定することで、信号光波長帯域内に存在するようにすることができる。このように、実施例4の長周期グレーティング素子は、信号光波長帯域において複数の損失ピーク波長を有していてもサイズが小さい。

### 請求の範囲

1. 光導波路の長手方向に沿って一定範囲の屈折率を数百 $\mu\text{m}$ オーダーで周期的に変調させた長周期グレーティング素子であって、

前記一定範囲には、複数の第1領域が離散的に配置され、これら第1領域内の各位置の屈折率は、前記一定範囲内全体を通じて第1の周期で屈折率が変調されているときと同一の屈折率に変調されていることを特徴とする長周期グレーティング素子。

2. 前記第1領域の長さ間の偏差およびその間の長さ間の偏差がいずれも前記第1の周期の2倍より小さいことを特徴とする請求項1記載の長周期グレーティング素子。

3. 前記第1領域の各領域の屈折率変調の振幅が互いに等しいことを特徴とする請求項1記載の長周期グレーティング素子。

4. 前記一定範囲内の前記第1領域を除いた領域に配置された複数の領域であって、各領域の各位置の屈折率は、前記一定範囲内全体を通じて前記第1の周期とは異なるそれぞれ固有の周期で屈折率が変調されているときと同一の屈折率に変調されている領域群を1つないし複数群備えていることを特徴とする請求項1記載の長周期グレーティング素子。

5. 前記一定範囲において各群の領域が隙間なく順番に配置されていることを特徴とする請求項4記載の長周期グレーティング素子。

6. 前記一定範囲において、前記各領域の長さ間の偏差およびそれらの間の長さ間の偏差がいずれも当該領域の屈折率周期の2倍より小さく設定されていることを特徴とする請求項4記載の長周期グレーティング素子。

7. 前記各領域のそれぞれの領域の屈折率変調の振幅が同一群内で互いに等しいことを特徴とする請求項4記載の長周期グレーティング素子。

8. 前記各領域のそれぞれの領域の屈折率変調の振幅が互いに等しいことを特徴とする請求項7記載の長周期グレーティング素子。

9. 前記第1領域の間には、それぞれ第2の領域が配置されており、前記第1領域、第2領域の配置周期を $L_0$ 、それぞれの設定長を $L_1$ 、 $L_2$ 、それぞれにおける屈折率周期を $\Lambda_1$ 、 $\Lambda_2$ とし、使用波長帯域の最短波長で損失ピークを得るために必要とされる長周期グレーティングの屈折率周期を $\Lambda_s$ 、同帯域の最長波長で損失ピークを得るために必要とされる長周期グレーティングの屈折率周期を $\Lambda_L$ とすると、以下の4式が満たされていることを特徴とする請求項7記載の長周期グレーティング素子。

$$\frac{\Lambda_1 L_0}{L_0 + \Lambda_1} < \Lambda_s$$

$$\frac{\Lambda_2 L_0}{L_0 + \Lambda_2} < \Lambda_s$$

$$\Lambda_L < \frac{\Lambda_1 L_0}{L_0 - \Lambda_1}$$

$$\Lambda_L < \frac{\Lambda_2 L_0}{L_0 - \Lambda_2}$$

10. 一定の範囲に沿ってその全域に所定の周期に応じてマスクパターンが形成された第1の強度変調マスクと、一定の範囲に沿って複数の光透過部の間に光遮断部が配置されている第2の強度変調マスクとを用意し、

これら2つの強度変調マスクを互いに重ねて加工対象となる光導波路上に配置し、

これら2つのマスクを透過した屈折率変化誘起光を前記光導波路に照射して屈折率変化を起こさせて長周期グレーティングを製造する

ことを特徴とする長周期グレーティング素子の製造方法。

11. 第1の強度変調マスクとしてマスクパターンの異なる複数のマスクを用意し、第2の強度変調マスクとして光透過部の配置の異なる複数のマスクを用意し、第1の強度変調マスクと第2の強度変調マスクの組み合わせを代えてマスクの配置、屈折率変化誘起光照射を繰り返すことを特徴とする請求項10記載の長周期グレーティング素子の製造方法。

要約

長周期グレーティング素子は、GeO<sub>2</sub>が添加されたコア領域とこれを取り囲むクラッド領域とを含む石英系の光ファイバの長手方向に沿った一定範囲において、複数の第1領域が離散的に配置され、これら第1領域内の各位置の屈折率は、一定範囲内全体を通じて第1の周期で屈折率が変調されているときと同一の屈折率に変調されている。